



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ULOŽENÍ ROTORŮ MODERNÍCH TURBODMYCHADEL

MODERN TURBOCHARGER ROTOR SUPPORTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DANIEL KORTÁN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ KNOTEK

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Daniel Kortán

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Uložení rotorů moderních turbodmychadel

v anglickém jazyce:

Modern Turbocharger Rotor Supports

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést úvod do problematiky turbodmychadel a ložisek používaných v uložení rotorů turbodmychadel. Dále se zaměřit na požadavky kladené na uložení rotorů turbodmychadel, dále popsat možnosti uložení rotorů turbodmychadel.

Cíle bakalářské práce:

- Základní pojmy z konstrukce turbodmychadel
- Porovnání vlastností kluzných a valivých ložisek
- Možnosti uložení rotorů turbodmychadel a jejich použití v současné době



Seznam odborné literatury:


- [1] ŠIMEK, Jiří. Uložení a dynamika rotorů turbodmychadel. [online]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/>
- [2] CHEN, W. J., GUNTER, E. J. Dynamics of rotor-bearing systems, Trafford publishing, Canada, 2010, 469s, ISBN 978-1-4120-5190-3
- [3] ALSAEED, A. A. Dynamic stability evaluation of an automotive turbocharger rotor-bearing system, 2005, Diploma thesis, Virginia Polytechnic Institute.
- [4] SCHAFER-NGUYEN H. Rotordynamics of automotive turbocharger, Springer publishing, New York Dortrecht London, 2012, ISBN 978-3-642-27518-0.

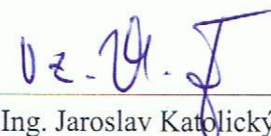
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Knotek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21.11.2014




prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na možnosti uložení rotorů turbodmychadel. První část je zaměřena na konstrukci turbodmychadel a popis principu přepřňovaných spalovacích motorů. Druhá část se zaměřuje na popis konstrukce valivých a kluzných ložisek a vysvětlení možností jednotlivých typů uložení používaných v turbodmychadlech v dnešní době.

KLÍČOVÁ SLOVA

Turbodmychadlo, turbína, dmychadlo, přepřňování, ložisko, valivé ložisko, kluzné ložisko, uložení rotoru

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the options of impositions of turbocharger rotors. The first part focuses on the construction of turbochargers and description of the principle of turbocharging engines with internal combustion. The second part focuses on the description of the construction of rolling and sliding bearings and explanation of options the particular types of impositions used in turbochargers nowadays.

KEYWORDS

Turbocharger, turbine, blower, turbocharging, bearing, rolling bearing, sliding bearing, imposition of rotor



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KORTÁN, D. *Uložení rotorů moderních turbodmychadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 31 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Knotek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Knotka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2015

.....

Daniel Kortán



PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě bakalářské práce, především pak Ing. Jiřímu Knotkovi za odborné rady a připomínky při psaní práce a ochotu a trpělivost. Také bych chtěl vyjádřit díky své rodině, která mi umožnila studovat a podporovala mě během celého studia.



OBSAH

| | |
|--|----|
| Úvod | 9 |
| 1 Historie turbodmychadel | 10 |
| 2 Princip přeplňování | 11 |
| 3 Konstrukce turbodmychadel..... | 13 |
| 3.1 Základní části turbodmychadel | 13 |
| 3.2 Regulace plnicího tlaku | 14 |
| 4 Ložiska používaná v turbodmychadlech | 15 |
| 4.1 Ložisková skříň..... | 15 |
| 4.2 Valivá ložiska | 16 |
| 4.3 Kluzná ložiska..... | 17 |
| 4.4 Porovnání vlastností ložisek | 18 |
| 5 Požadavky kladené na uložení rotorů turbodmychadel | 19 |
| 5.1 Vibrace rotoru turbodmychadla | 20 |
| 5.2 Kmitání rotoru turbodmychadla..... | 21 |
| 6 Možnosti uložení turbodmychadel | 22 |
| 6.1 Plně plovoucí uložení..... | 22 |
| 6.2 Částečně plovoucí uložení | 23 |
| 6.3 Radiálně axiální uložení..... | 24 |
| 6.4 Uložení v kuličkových ložiscích..... | 25 |
| 7 Další vývoj turbodmychadel..... | 26 |
| Závěr..... | 27 |
| Použité informační zdroje..... | 28 |
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 30 |
| Seznam obrázků..... | 31 |



ÚVOD

Dříve se na turbodmychadla pohlíželo jako na prostředek sloužící ke zvýšení výkonu motoru. Dnešní přísné emisní limity oxidů uhlíku a dusíku nutí výrobce osobních automobilů ke stálému snižování objemu motoru. Jedná se o takzvaný „downsizing“. Aby výrobci automobilů při sníženém objemu mohli zachovat vysoký výkon motoru, používají přeplňování výfukovým turbodmychadlem. Díky němu jsou současně schopni snížit měrnou spotřebu paliva a s ní související omezení emisí CO_2 .

Cílem přeplňování je také vyšší výkon a kroutící moment ve středních a vyšších otáčkách srovnatelný s motory o vyšším objemu. Tímto způsobem lze dosáhnout snížení měrné spotřeby. Současně také dochází ke zvýšení maximálních tlaků ve spalovacím prostoru a s tím související větší zatížení klikového hřídele a nároky na jeho uložení a pevnostní nároky na píst.

Tato práce je zaměřena na to, provést úvod do problematiky turbodmychadel, stručně vysvětlit a popsat základní pojmy týkající se konstrukce a fungování turbodmychadel. Dále pak vysvětlit princip přeplňování spalovacích motorů. Zaměřena je hlavně na ložiska používaná v uložení rotorů moderních turbodmychadel, porovnání vlastností kluzných a valivých ložisek v uložení turbodmychadel, požadavky kladené na uložení a popisuje nejpoužívanější možnosti uložení rotorů turbodmychadel v dnešní době.



1 HISTORIE TURBODMYCHADEL

Už na přelomu 19. a 20. století se Gottlieb Daimler a Rudolf Diesel pokoušeli zvyšovat výkon motoru a zároveň snižovat spotřebu paliva stlačováním nasávaného vzduchu. První turbodmychadlo poháněné výfukovými plyny zkonstruoval doktor Alfred J. Buchi mezi léty 1909 až 1912. V roce 1915 postavil vznětový motor s impulzním přeplňováním, ale jeho návrh se nedočkal úspěchu.[17]

Před druhou světovou válkou se přeplňování dostalo do velkých lodních a stacionárních průmyslových motorů. Válka přinesla rozvoj plynových turbín a tím i vznik nových konstrukcí a materiálů, které zapříčinily další možnosti vývoje turbodmychadel.

V roce 1954 Kurt Beierer zkonstruoval první kompaktní model turbodmychadla a umožnil výrobcům nákladních vozidel, jako bylo například Volvo, Scania nebo americký distributor diesellových motorů Cummins, výrobu nákladních automobilů vybavených turbodmychadlem. Prvními přeplňovanými osobními automobily byly v roce 1963 Chevrolet Corvair Monza a Oldsmobile Jetfire. Kvůli nespolehlivosti byla brzy ukončena jejich výroba.[17]

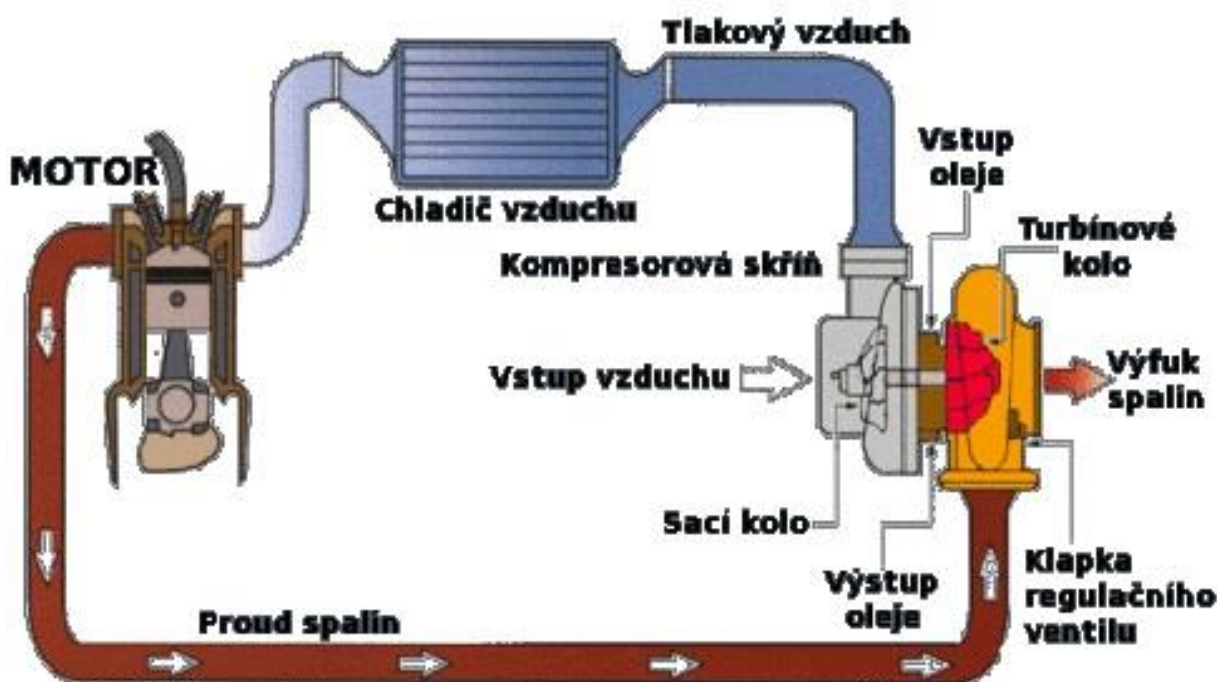
V 70. letech se přeplňované motory dostávají i do motorsportu a hlavně do formule 1. K průkopníkům přeplňování patřilo také Porsche a švédský Saab. Nastávající ropná krize a přísnější emisní limity způsobily rozvoj vznětových přeplňovaných motorů. V roce 1978 vyvinul svůj první model Mercedes-Benz. Jednalo se o řadu 300 s označením SD. Následován byl Volkswagenem v roce 1981, který přišel se svým modelem Golf a motorem 1.6 TD. Dalším krokem dopředu byly v 90. letech motory TDI a zavedení elektronického řízení vznětových motorů.[17]

2 PRINCIP PŘEPLŇOVÁNÍ

Turbodmychadlo je dmychadlo poháněné pomocí výfukových plynů motoru. Slouží k nucenému přeplňování agregátů zážehových i vznětových. Jeho přínosem je zvýšení výkonu a kroutícího momentu motoru.

Lopatky turbíny jsou roztáčeny tepelnou energií výfukových plynů. Rotor turbodmychadla se v závislosti na velikosti, použití a typu turbodmychadla otáčí vysokou rychlostí. Velká turbodmychadla používaná v lodních motorech se otáčí rychlostí maximálně 50 000 otáček za minutu, zatímco malá turbodmychadla používaná v moderních osobních automobilech se mohou otáčet až 300 000 otáček za minutu. Turbína je spojena hřídelí s kompresorem a nasává čerstvý vzduch. Ten je následně stlačován. Po stlačení je plněn do válců. Při stlačování vzduchu dochází k jeho ohřátí až na 180°C. Takto ohřátý vzduch může být ochlazován v mezichladiči stlačeného vzduchu v tzv. intercooleru, kde dojde k jeho ochlazení a tím i zvýšení hustoty pro plnění do válců. Teplota stlačeného vzduchu na výstupu z mezichladiče by měla dosahovat přibližně teploty nasávaného vzduchu. Tlaky bez chlazení plnicího vzduchu se pohybují v rozmezí hodnot 0,02-0,18 MPa a tlaky s chlazením v rozmezí 0,05-0,22 MPa. Nárůst tlaku se měří obvykle v pascálech, barech nebo PSI. Kde 1 bar je přibližně 100 kPa a 14,7 PSI.[14]

Schéma principu přeplňovaného motoru obtokovým turbodmychadlem se zařazeným mezichladičem stlačeného vzduchu, je zobrazen na Obr. 1.



Obr. 1 Schéma přeplňovaného motoru se zařazeným mezichladičem[2]



Turbodmychadlo zvyšuje tlak vzduchu hnaného do válců, zvyšuje jeho hustotu a tím i jeho měrnou hmotnost. Při zvyšování množství vzduchu, se musí zvýšit i přísun paliva. Pro ideální spalování směsi musí být zachován poměr paliva a vzduchu, takzvaný Stechiometrický poměr λ rovný jedné. Jedná se o poměr pro spálení 1 kg paliva a 14,7 kg vzduchu pro benzín a 14,5 kg vzduchu pro naftu. Vyšší hmotnost vzduchu při stejném objemu a otáčkách umožňuje použití vyššího množství paliva při zachování stejného poměru směsi. Při jednom cyklu tedy dojde k reakci většího molárního množství plynů, což je příčinou výrazného nárůstu výkonu motoru při zachování zdvihového objemu a téměř i vnějších rozměrů a snížení měrné spotřeby. Nevýhodou je zvýšené mechanické namáhání dílů motoru, způsobené nárůstem tlaků, se kterým je potřeba počítat při návrhu motoru.[14]

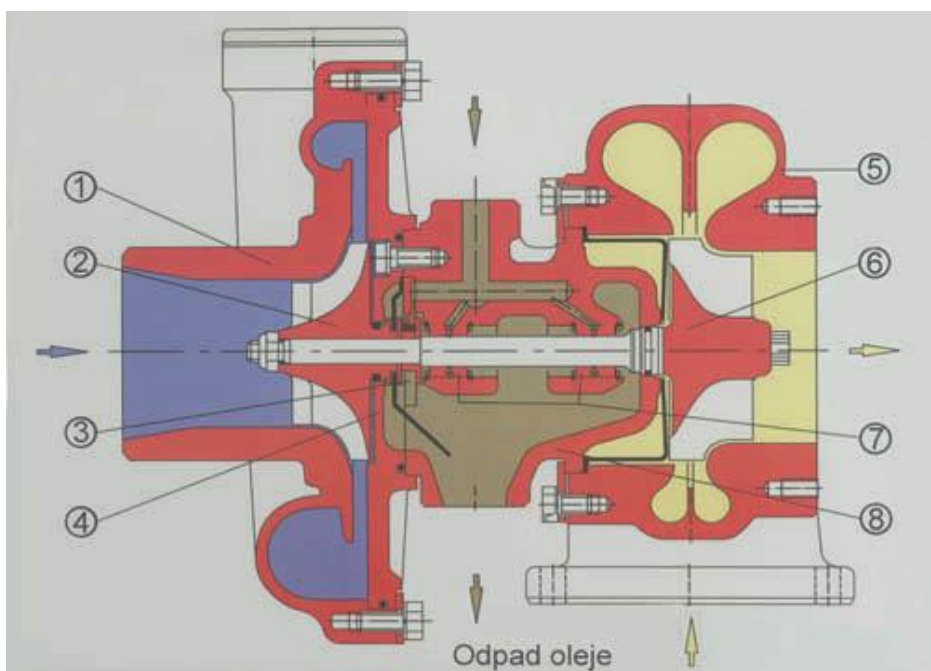
Maximální hodnota plnicího tlaku vzduchu je dána výrobcem motoru a nesmí být překročena. Dnešním trendem je nastavovat maximální plnicí tlak turbodmychadla do nižších otáček motoru, kvůli zvýšení točivého momentu motoru a následné lepší pružnosti motoru a ochoty akcelarovat z nižších otáček. Pozitivem je možnost udržovat motor v nižších otáčkách, přínosem je požadované snížení spotřeby paliva. Ve vysokých otáčkách motoru dochází k překročení maximálního plnicího tlaku vzduchu. Z tohoto důvodu je nutné otáčky turbodmychadla regulovat. Jednotlivé typy regulace turbodmychadel jsou popsány v podkapitole 3.2.

3 KONSTRUKCE TURBODMYCHADEL

3.1 ZÁKLADNÍ ČÁSTI TURBODMYCHADEL

Turbodmychadlo se skládá ze tří základních částí. Z kompresorové skříně, turbínové skříně a ložiskové skříně. Kompresorové a turbínové oběžné kolo je spojeno a uloženo na společné hřídeli. Ložiska jsou mazána olejovým systémem motoru a jsou velice náchylná na kvalitu oleje. Kvůli vysokým oběžným rychlostem a velkým teplotním rozdílům mezi kompresorem a turbínou, vyžadují vysoce přesnou výrobu a odolné materiály.

Na Obr. 2 je vidět řez turbodmychadlem s popisem jeho základních částí.



Obr. 2 Řez turbodmychadlem[19]

(1)-kompresorová skříň, (2)-kompresorové kolo, (3)-axiální olejové ložisko, (4)-zadní stěna kompresorové skříně, (5)-turbínová skříň, (6)-turbínové kolo, (7)-radiální olejová ložiska, (8)-ložisková skříň

Turbínové kolo je ve většině případů vyrobeno ze žáruvzdorné niklové slitiny a kompresorové kolo je z hliníkové slitiny. Skříň turbíny společně se skříní ložisek jsou odlity z temperované šedé litiny a skříň kompresoru je opět z hliníkové slitiny. Některá výkonnější turbodmychadla mohou být chlazena vodou.[14]



3.2 REGULACE PLNÍCIHO TLAKU

Trendem dnešní doby je naladění turbodmychadla k dosahování maximálních plnicích tlaků již ve středních nebo nižších otáčkách motoru (okolo 2000 ot/min). Jsme schopni ideálně naladit komponenty turbodmychadla jen na omezené rozsahy charakteristik, proto je potřeba je přizpůsobit vozidlovému motoru, to znamená velkému rozsahu otáček a zatížení. Samotné těleso turbodmychadla je dimenzováno na menší hmotnostní toky výfukových plynů, které odpovídají nízkým otáčkám motoru. S rostoucími otáčkami motoru by tak docházelo k přetáčení rotoru turbodmychadla, na které nejsou dimenzována ložiska nebo nežádoucímu nárůstu plnicího tlaku. Z těchto důvodů je důležité plnicí tlak turbodmychadla regulovat.

Méně efektivní řešení regulace turbodmychadla je odpouštět stlačený vzduch ze sání. Toto řešení je dnes nahrazeno mnohem účinnějšími metodami. K odpouštění výfukových plynů před turbínou obtokovým ventilem (wastegate), slouží klapka, která otvírá kanál (bypass). Ovladačem bývá pneumatický prvek, řízený tlakem vzduchu z kompresoru. Tlak působí na membránu tlakového spínače proti síle pružiny. V okamžiku, kdy je plnicím tlakem překonáno předepnutí pružiny, ventil se otevře a dojde k odpuštění části výfukových plynů mimo těleso turbodmychadla. Regulační ventil může být umístěn na libovolném místě výfukového potrubí před turbínou.[20]

Druhým nejpoužívanějším způsobem regulace je změna geometrie rozváděcích lopatek statoru turbíny (VNT). Při tomto způsobu regulace protéká tělesem turbíny stále stejný průtok výfukových plynů. Naklápěcí lopatky jsou umístěny po obvodu statoru turbíny. Je využíváno zákona kontinuity, který říká, že konstantní objem plynů proudí potrubím tím rychleji, čím menší má potrubí průřez. Při nízkých otáčkách motoru je požadován vysoký plnicí tlak turbodmychadla, proto je nastavitelnými lopatkami zmenšen průřez, kterým proudí výfukové plyny. Tlak před lopatkami se zvýší, rychlost plynů v zúženém místě se také zvýší, to způsobí nárůst otáček turbodmychadla a tím zvýšení plnicího tlaku kompresoru. Naopak ve vysokých otáčkách je zvětšen průtočný průřez proudících plynů v místě rozváděcích lopatek, turbodmychadlo se točí nižšími otáčkami, a proto nedojde k překročení maximálního plnicího tlaku. Samotné ovládání rozváděcích lopatek je řešeno pneumaticky nebo v dnešní době přesněji elektrickými akčními členy. Další typy regulace jsou například změna šířky statoru turbíny (VGT) nebo natáčení řídicí směrové klapky. Používá se také kombinace řídicí směrové klapky a obtokového ventilu, která využívá výhody obou řešení.[14]



4 LOŽISKA POUŽÍVANÁ V TURBODMYCHADLECH

Ložisko je typizovaná součást strojního zařízení, které umožňuje snížit tření mezi vzájemně se pohybujícími součástmi. Tření se projevuje ztrátou mechanické energie a vznikem tepla. Použitím ložisek klesá tření, následkem toho roste účinnost stroje. Ložiska umožňují otočné uložení čepů a hřídelí a zároveň absorbují a zabraňují rozkmitání uloženého rotoru.[9]

Ložiska se dělí několika způsoby. Základní rozdělení je podle druhu tření na kluzná a valivá. Kluzné ložisko obepíná čep prostřednictvím pouzdra nebo pánve a dotyk s kluznou vrstvou je tak po celém povrchu ložiska. Zatímco valivá ložiska používají valivé segmenty (kuličky, válečky) a dotyk ložiska s hřídelí je bodový nebo čárový. Další rozdělení je podle smyslu působící síly na axiální a radiální. U axiálních ložisek síla působí ve směru osy rotace a u radiálních ložisek působí síla kolmo na osu rotace. Pokud jsou zatěžující síly v rovnováze, mluvíme o ložiscích kombinovaných.[7]

4.1 LOŽISKOVÁ SKŘÍŇ

Centrální částí tělesa turbodmychadla je ložisková skříň. Tvoří spojení mezi turbínovou a kompresorovou částí. Zároveň umožňuje vedení mazacího a chladicího oleje. V této části se nacházejí ložiska a prochází tudy hřídel spojující turbínové a kompresorové oběžné kolo. Vlivem vysokých obvodových rychlostí rotujících částí turbodmychadla vznikají síly, které musejí být ložiskovou skříní, potažmo pouzdry ložisek absorbovány. Z tohoto důvodu je skříň vyrobena velice tuhá. Dále tato část obsahuje zajišťovací a těsnící elementy.

Ložisková skříň je nejčastěji dutá, dělená a orientována jako svislá. Ve skříní se nachází otvor pro hřídel a vybrání pro ložisková pouzdra. A dále drážky pro těsnící a pojistné kroužky. Dále se zde nachází vstupní, výstupní a průtokové olejové kanály. Konstrukce kanálů zajišťuje plynulý tok oleje z motorového prostoru. Proto je kanál větší na výstupu a menší na vstupu. Z tohoto důvodu není potřeba použití olejového čerpadla. Olej je přiváděn pod tlakem z olejového okruhu motoru. Výrobci turbodmychadel uvádějí tlak oleje na vstupu okolo 4 barů. Ke zvýšení životnosti může být vhodné umístit dodatečné chlazení oleje kvůli lepšímu odvodu tepla z ložiskové skříně.[8]



Obr. 3 Ložisková skříň s kompresorovým a turbínovým oběžným kolem[6]



4.2 VALIVÁ LOŽISKA

Valivým ložiskem označujeme takové ložisko, ve kterém se přenáší zatížení prostřednictvím valivých těles, které se odvalují téměř bez skluzu.[7] Pokud byla u turbodmychadel použita valivá ložiska, ve většině případů se jednalo o ložiska s kuličkovými segmenty, výjimečně s válečkovými. Výhodou valivých ložisek je snížení třecích ztrát, literatura uvádí až o 50%. Díky tomu mají turbodmychadla vybavená valivými ložisky velice rychlý nástup a snadno se roztáčejí. Toto vyhovuje nárokům na vysoký plnicí tlak po sešlápnutí plynového pedálu. Také dovolují vyšší zatížení oproti ložiskům klzným a mají krátkou zástavbovou délku. Hlavními nevýhodami valivých ložisek je špatná schopnost tlumení kvůli nízké vrstvě maziva, velké nároky na přesnost výroby, vysoká pořizovací cena a vysoká hlučnost. Při dnešních nárocích na zvyšující se otáčky turbodmychadel, se hledají nové materiály, které by byly schopné vydržet a zajistit dlouhodobý bezproblémový chod turbodmychadel. Pro nynější valivá ložiska jsou vysoké otáčky limitní.[3]



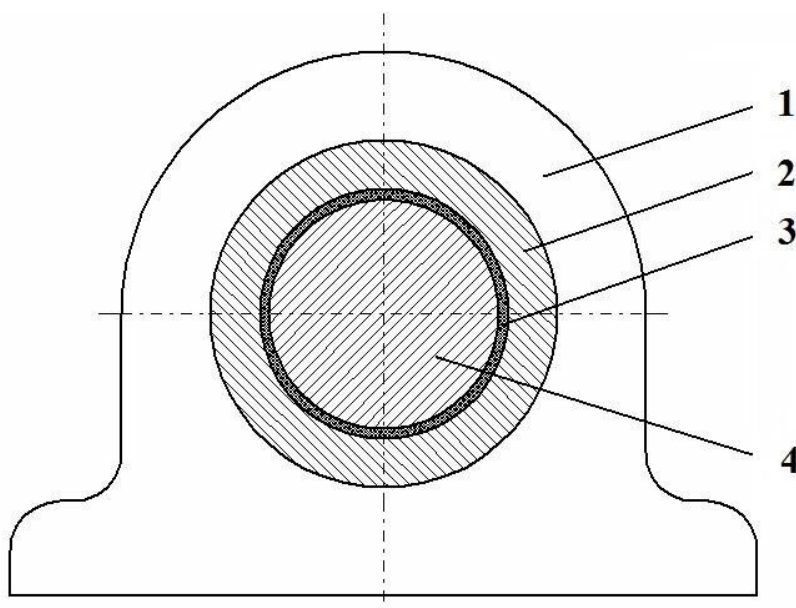
Obr. 4 Ložisková jednotka s valivými ložisky pro turbodmychadla[16]

4.3 KLUZNÁ LOŽISKA

Kluzné ložisko obepíná čep hřídele přímo nebo prostřednictvím pouzdra či pánve.[9] Pouzdro má tvar dutého válce a může být s výstelkou nebo bez výstelky, která umožňuje využít rozdílných vlastností materiálu na kluzné ploše ložiska. Pouzdra mohou být válcová nebo přírubová. Pánev má tvar dutého válce, který je rozdělen v podélné ose.

Běžná turbodmychadla používají nejčastěji kluzná ložiska s plovoucím pouzdrem, která jsou mazána tenkou vrstvou oleje, který je přiváděn z motoru. Důležitý je přívod čerstvého oleje na kontaktní plochu mezi hřídel a ložisko, aby byl zachován olejový film a bylo dosaženo ochrany samotného ložiska a hřídele. Olejová vrstva také slouží k tlumení vibrací hřídele. Ložiska jsou konstruována tak, aby během zatížení nedošlo ke kontaktu s hřídelí. Kluzná ložiska jsou charakteristická většími ztrátami v porovnání s ložisky valivými, to má za následek pomalý náběh turbodmychadla a velkou prodlevu po přidání plynu.[12]

Kluzná ložiska se vyznačují tichým chodem, nižšími nároky na přesnost výroby a nižší pořizovací cenou v porovnání s ložisky valivými. Snazší je demontáž a možnost přesného uložení hřídele. Vysoké nároky jsou kladeny na hydrodynamické tlakové mazání. Radiální kluzná ložiska zajišťují dvě základní funkce, umožňují otočné uložení rotoru a současně zachycují radiální síly, které na něj působí.[11]



Obr. 5 Radiální kluzné ložisko[13]

(1)-ložiskové těleso, (2)-ložiskové pouzdro, (3)-mazací vrstva oleje, (4)-čep rotujícího hřídele



4.4 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ LOŽISEK

Valivá ložiska konkrétně ložiska kuličková jsou typická svojí vysokou životností a malými třecími ztrátami. Z toho plyne snadné roztáčení rotoru turbodmychadla a požadované snížení jeho prodlevy. Další výhodou je krátká zástavbová délka ložiska. Jsou nezávislá na mazacím okruhu motoru. Naopak nevýhodou jsou vysoké nároky na přesnost při výrobě a z toho plynoucí vysoká pořizovací cena. Další nevýhodou je větší hlučnost při vyšších otáčkách v porovnání s ložiskem kluzným podobných parametrů.

Použití kuličkových ložisek se obecně volí pro rotory otáčející se a pracující ve spektru nižších otáček. Proto nejsou vhodná pro moderní turbodmychadla, a používala se spíše v turbodmychadlech lodních a velkých stacionárních motorů, nebo historických vozidlových motorů. Otáčky, kterých dosahují moderní turbodmychadla, jsou pro kuličková ložiska limitní. Vývoj posledních let přinesl speciální valivá ložiska s keramickými kuličkovými nebo válečkovými segmenty s malým průměrem pro dosažení ještě nižšího tření, která zvládají vysoké otáčky. Zůstává tu stále vysoká pořizovací cena. Proto jsou používána v závodních motorech, kde není požadována vysoká životnost, bez ohledu na pořizovací cenu.[11]

Pro použití kluzných ložisek hovoří jejich nízká hlučnost a tichý chod i při vysokých obvodových rychlostech, malé nároky na přesnost výroby a nízká pořizovací cena. Také je snazší montáž a demontáž a umožňují velice přesné uložení hřídele. Vysoké nároky jsou kladeny na intenzivní hydrodynamické tlakové mazání, které zajišťuje mazací okruh motoru. Jsou charakteristické většími ztrátami, kde je uváděno až 50% navýšení oproti ložiskům kuličkovým, a menší únosností při rozběhu a doběhu. *Při rozběhu je tření dvakrát větší, než za chodu.*[7] To znamená pomalejší rozběh rotoru a větší turbolag. Také zástavbová délka ložiskového pouzdra je větší než u ložisek kuličkových.[12]

V současné době je běžné u turbodmychadel vozidlových motorů uložení rotoru v kluzných ložiscích. Použití kluzných ložisek je podmíněno ložiskovým pouzdrem, které je zajištěno pojistnými kroužky. Používají se dva typy. Pevná nebo také zastavená pouzdra neumožňují velká navýšení plnicích tlaků, zatímco pouzdra plovoucí nebo také pohyblivá, která se otáčejí 2/3 rychlostí rotoru jsou dnešním standardem.[12]



5 POŽADAVKY KLADENÉ NA ULOŽENÍ ROTORŮ TURBODMYCHADEL

Ideální uložení rotorů turbodmychadel by mělo splňovat několik základních požadavků. Jedním z nejdůležitějších požadavků na uložení, je vlastnost ložiska co nejvíce snížit třecí ztráty. K tomuto účelu jsou nejvhodnější ložiska kuličková. Jejich vysoké požadavky na přesnost výroby a vysoká pořizovací cena, nedovolí širšímu využití těchto ložisek. Proto jsme nuceni k použití ložisek kluzných. Důležité je správné využití rozdílných vlastností materiálů na kluzné ploše ložiska. Kluzná vrstva ložiska bývá vyrobena ze slitin hliníku, cínu, mědi nebo zinku.

Dalším požadavkem souvisejícím s touto problematikou je nárůst tření při rozběhu nebo doběhu rotoru turbodmychadla. Součinitel tření při rozběhu rotoru je až dvakrát větší oproti součiniteli při chodu rotoru. Ideální ložisko musí být schopno toto tření snížit. Tímto se umožní rychlejší rozběh turbodmychadla a znatelně se omezí prodleva. Opět jsou zde vhodnější ložiska kuličková nebo válečková, která znatelně snižují součinitel tření. Důvodem pro použití ložisek kluzných, jako v předchozím případě, jsou pořizovací náklady.[3]

Moderní kluzná ložiska jsou velice náchylná na kvalitu oleje. Jedním z požadavků na uložení rotoru, je udržení vysoké spolehlivosti a životnosti turbodmychadla. Způsob jak zajistit správný chod ložiska je dostatečné hydrodynamické tlakové mazání, zajištěné z mazacího okruhu motoru, použití kvalitního oleje předepsané normy a včasná výměna. Opotřebením kluzných ložisek může vést k úniku oleje. To má za následek zvýšenou kouřivost hlavně u vznětových motorů, zanášení sání a spalovacího prostoru a zničení katalyzátoru.[12]

Důležitým aspektem je i požadovaná nízká hlučnost uložení rotoru. Tento požadavek splňují lépe ložiska kluzná. I při vysokých obvodových rychlostech, které moderní turbodmychadla osobních vozidel dosahují (až 300 000 ot/min), jsou schopna udržet hluk na přijatelné úrovni. Uložení lze realizovat i pomocí kuličkových ložisek, ale použití je vhodné pro turbodmychadla, která se otáčejí nižšími otáčkami. Vysoké otáčky moderních turbodmychadel jsou pro valivá ložiska limitní. Je známo, že turbodmychadla mohou „pískat“. Zvýšený hluk může být projevem nevyváženosti pohyblivých součástí nebo projevem zvýšené vůle kluzných ložisek, která již nejsou schopna zabránit styku s ložiskovou nebo turbínovou skříní. Pokud takový kontakt nastane, dochází k havárii turbodmychadla.[3]

Další neméně důležitým požadavkem na uložení jsou zástavbové rozměry. Kuličková ložiska jsou méně vhodná z důvodu větších nároků na potřebu místa, hlavně nutnosti použití většího průměru ložiska. Kluzná ložiska dovolují zmenšit potřebnou zástavbovou délku a umožňují výrobu kompaktnějších turbodmychadel. S tímto souvisí i potřeba montáže nebo demontáže ložiska, která hovoří ve prospěch ložisek kluzných. Kluzná ložiska dovolují přesnější uložení hřídele, než srovnatelná ložiska kuličková.

Dalším kritériem pro uložení rotorů je schopnost tlumení vibrací a rázů. Valivá ložiska jsou méně vhodná z důvodu nízké vrstvy maziva, která rázy tlumí. Vhodnější pro použití v uloženích rotorů turbodmychadel jsou ložiska kluzná, kde tlumení zajišťuje dostatečná olejová vrstva mezi ložiskem a hřídelí. Typy vibrací rotoru turbodmychadla jsou popsány v podkapitole 5.1.[3]



5.1 VIBRACE ROTORU TURBODMYCHADLA

Turbodmychadla jsou strojní součásti, které pracují ve velkém rozmezí teplot a otáček. Velká turbodmychadla stacionárních motorů se otáčejí v rozmezí jednotek až desítek tisíc otáček, na druhou stranu turbodmychadla osobních vozidel překračují i několik stovek tisíc otáček. Turbodmychadla mají různé velikosti a hmotnosti rotujících částí.

V tabulce 1 jsou zobrazeny parametry hmotnost m , otáčky Ω , nevyváženost U a síla generující z nevyváženosti F_u .

Tab. 1 Parametry různých typů turbodmychadel[3]

| Typy turbodmychadel | Hmotnost $m[\text{kg}]$ | Maximální otáčky rotoru $\Omega[\text{min}^{-1}]$ | Nevyváženost $U[\text{g/mm}]$ | Síla od nevyváženosti $F_u[\text{N}]$ |
|--------------------------------|----------------------------|---|----------------------------------|---|
| Automobilová turbodmychadla | 0,05-2 | 150 000-300 000 | 0,1-1 | 20-500 |
| Strojní turbodmychadla | 5-1000 | 3000-20 000 | 2,5G | 550-1000 |

Každé vysokootáčkové zařízení, jako je turbodmychadlo, vytváří svým pohybem vibrace. Čím vyšší má rotor otáčky, tím větší budí vibrace. Původcem vibrací jsou nevyvážky na rotoru, způsobené nepřesností výroby nebo pulzací ve výfukovém potrubí. Proto musí každý konstruktér s tímto faktem při návrhu počítat.[3]

Nevyváženost se dá pochopit, jako velikost odchylky od rovnovážného stavu. Osa momentu setrvačnosti je totožná s osou rotace tělesa. Existují dva typy vyvažování, statické a dynamické. Statické se provádí za klidu, kde těžiště tělesa leží v ose rotace. Dynamické vyvažování se provádí za rotace a předpokládá se, že rotor bude už staticky vyvážen.[5]

Existují dva typy vibrací rotoru, které způsobují „pískání“ turbodmychadla. Prvním jsou dynamické nestability a druhým samobuzené vibrace. Samobuzené vibrace vznikají v ložisku za provozu vlivem nevyváženosti rotoru, nebo prohnutím hřídele. Prohnutí i nevyváha jsou způsobeny nadměrným tepelným zatěžováním. Samobuzené vibrace se eliminují vyvažováním. Prohnutí hřídele se odstraňuje jeho rovnáním a nevyváha ubíráním materiálu rotoru.[8]

Vznik dynamické nestability je podmíněn vlivem příčného samobuzeného kmitání, které nastává v oblasti sub-synchronních frekvencí. Tyto nestability se nazývají vířením rotoru a tlúčením oleje (oil whirl, oil whip). Zdrojem nestability je tlumení rotoru (hysteretic whirl), aerodynamické síly, které působí na oběžná kola turbodmychadla a ložiskový olej, ve kterém vzniká tangenciální (destabilizační) složka síly.[12]

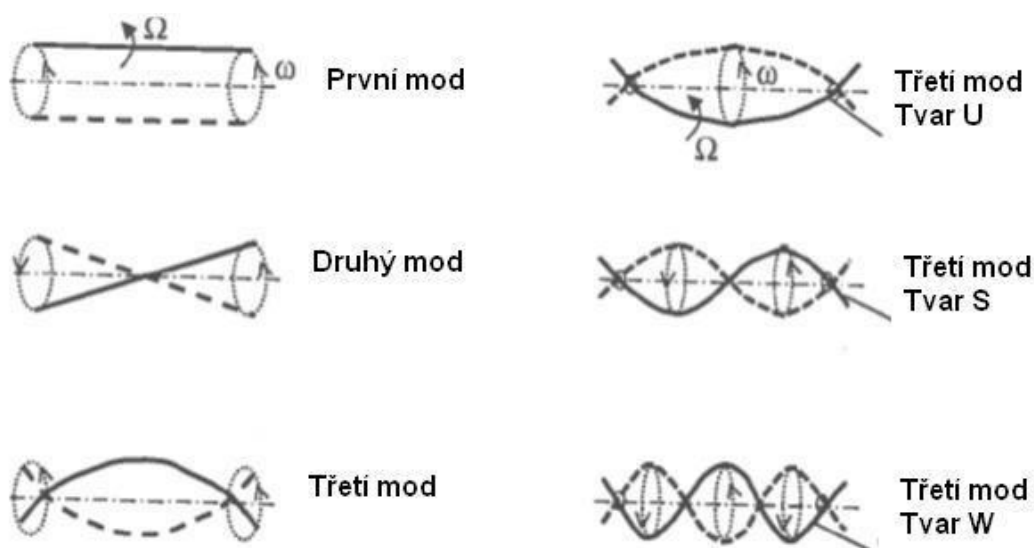


5.2 KMITÁNÍ ROTORU TURBODMYCHADLA

Každé těleso má své vlastní frekvence, které jsou dány charakteristikou použitého materiálu a hmotností. Na kmitání rotoru mají vliv otáčky rotoru Ω a nevyváženost rotoru U . Průměr kompresorového a turbínového kola je mnohem větší než průměr hřídele a rozložení hmoty je koncentrováno dále od těžiště. Z těchto důvodů je i gyroskopický efekt oběžných kol významnější. Je přímo úměrný otáčkám rotoru. Proto se s jeho hodnotami při návrhu také musí počítat. Gyroskopický efekt vychází z teorie gyroskopického momentu a změny momentu hybnosti. Tento efekt zvyšuje tuhost rotoru při dopředném víření a naopak při zpětném víření ji snižuje během zvyšování otáček.[1]

U rotoru turbodmychadla rozeznáváme několik módů kmitání. V oblasti nízkých otáček se rotor chová, jako tuhý. První mód kmitání má cylindrický tvar. Oběžné kompresorové a turbínové kolo se otáčí stejným směrem a stejnou obvodovou rychlostí. Druhý mód se nazývá naklápěcí, kónický nebo také kuželovitý. Zde se mění směr precesní rychlosti oběžných kol. Třetí mód je mód ohybový. Nevyváženost narůstá s kvadrátem otáček. Při vysokých otáčkách začíná být tento efekt významný. Hřídel se posouvá směrem k ložiskové stěně. Se zvyšováním otáček se ohybový mód rozděluje pro první, druhé a třetí kritické otáčky na tvary U, S a W.[1]

Na obrázku 6 jsou zobrazeny módy kmitání hřídele.



Obr. 6 Módy kmitání hřídele [8]

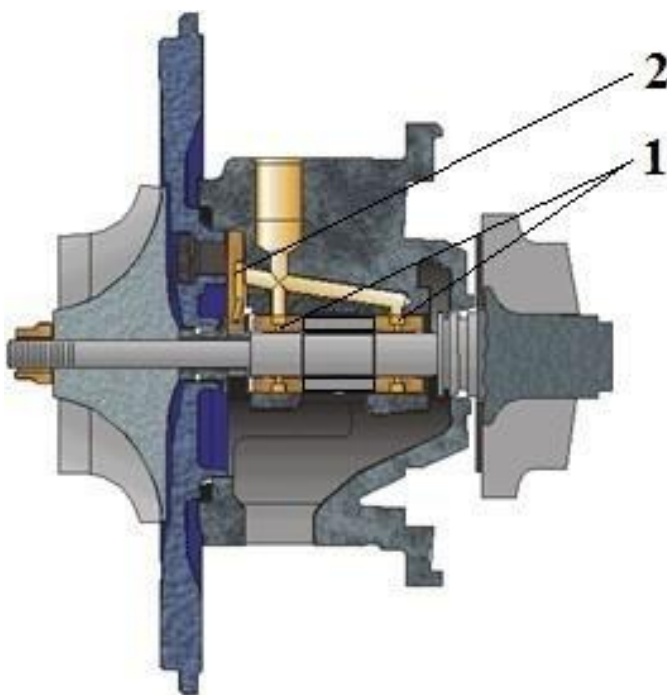


6 MOŽNOSTI ULOŽENÍ TURBODMYCHADEL

Rotor turbodmychadla může být uložen několika způsoby v závislosti na typu a počtu použitých ložisek. Nejčastějšími jsou plně plovoucí uložení, částečně plovoucí uložení a radiálně axiální uložení.

6.1 PLNĚ PLOVOCÍ ULOŽENÍ

Plně plovoucí uložení je realizováno pomocí dvou běžných radiálních kluzných ložisek, která jsou opatřena dvěma pouzdry a jedním axiálním ložiskem. Ložiska jsou v ložiskové skříni jištěna a vymezena výstředníkem. Ložiska a hřídel jsou odděleny vnitřní a vnější vrstvou maziva. Ložisková pouzdra se otáčejí rychlostí 0,15 až 0,35 rychlosti hřídele. Rychlost otáčení je závislá na geometrii pouzder a hlavně na zatížení ložisek, kde u více zatížených ložisek, hlavně na straně turbíny, bývají otáčky pomalejší. Tato koncepce je často využívána u velkých a výkonných motorů. Také se s nimi můžeme setkat u starších nákladních automobilů. Rozměry kompresorového oběžného kola se často pohybují mezi 70 a 200 milimetry.[10]



Obr. 7 Schéma plně plovoucího uložení[15]

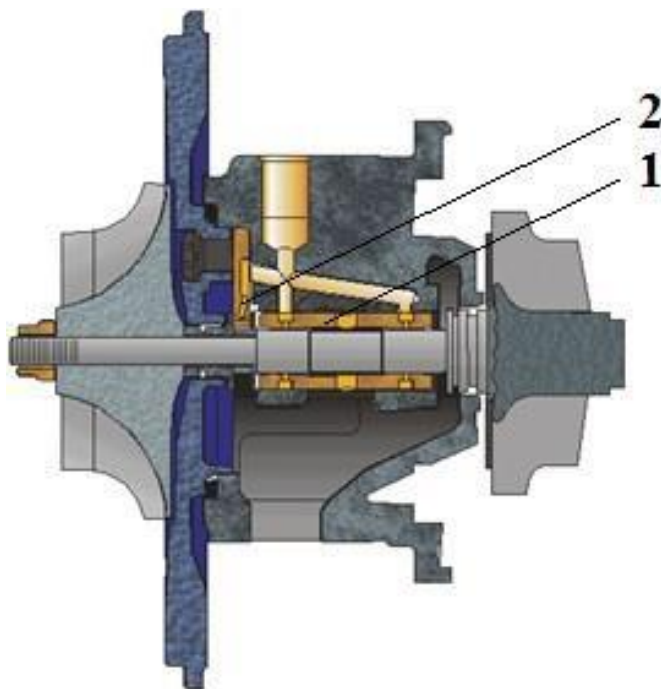
(1)-radiální kluzná ložiska, (2)-axiální kluzné ložisko



6.2 ČÁSTEČNĚ PLOVOUCÍ ULOŽENÍ

Částečně plovoucí uložení se vyznačuje uložení rotoru turbodmychadla ve společném plovoucím pouzdře. Ložiskové těleso je proti pootočení zajištěno čepem a správná poloha ložiska je dána pojistnými kroužky. Z důvodu nerotujícího pouzdra zde nemůže nastat nestabilita ve vnějším olejovém filmu, který slouží k tlumení vibrací. Stejně jako v předchozím případě, tak i zde, může být uložení realizováno pomocí dvou radiálních kluzných ložisek uložených v jednom delším zastaveném pouzdru. Tím lze dosáhnout větší účinné plochy a účinnějšího tlumení vibrací. Proti působící axiální síle je ložisko jištěno čepem, ale může být také použito samostatné axiální kluzné ložisko stejně jako v případě plně plovoucího uložení.[10]

S touto koncepcí uložení rotoru turbodmychadla se běžně setkáme v motorech o objemu mezi 1,5 až 5 litry s rozměry kompresorového oběžného kola od 40 do 80mm.[10]



Obr. 8 Schéma částečně plovoucího uložení[15]

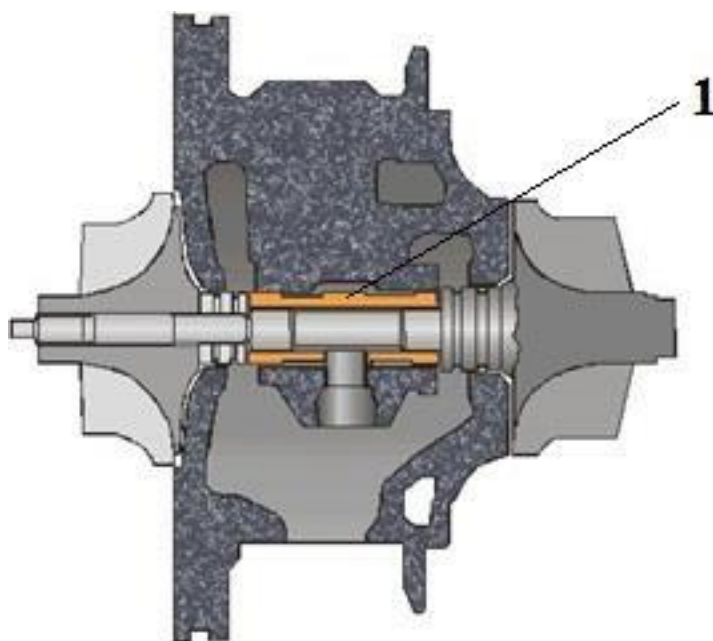
(1)-společné ložiskové plovoucí pouzdro, (2)-axiální kluzné ložisko



6.3 RADIÁLNĚ AXIÁLNÍ ULOŽENÍ

Radiálně axiální uložení je uskutečněno jedním radiálně axiálním sdruženým pouzdrem, které je zastavené. K zastavení slouží čep vložený do otvoru na straně pouzdra. Jedná se o takzvané Z-ložisko, které má tvar dutého válce s vybráním ve vnitřní válcové ploše. Dotyk ložiska s hřídelí je uskutečněn na okrajích. Velkou výhodou tohoto seskupení je vynechání axiálního ložiska, které by zabraňovalo posunu uložení.[10]

Tato koncepce je využívána u malých motorů o objemu maximálně do 1,8 litru a s rozměry kompresorového oběžného kola do 70 milimetrů v průměru.[12]



Obr. 9 Schéma radiálně axiálního uložení[15]

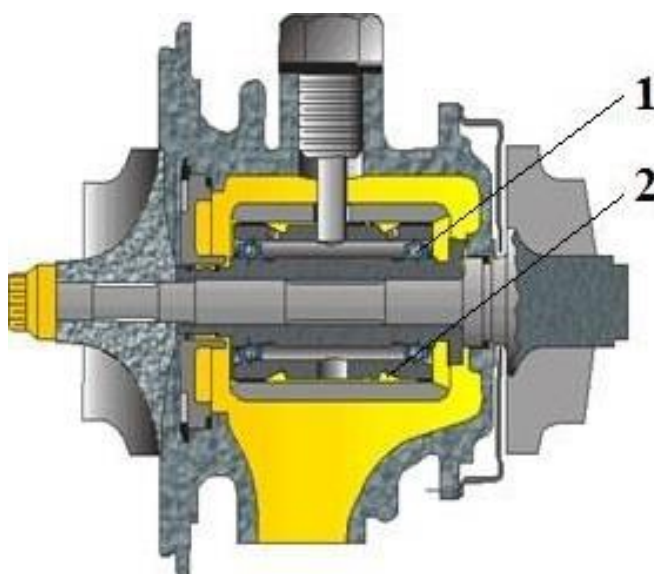
(1)-radiálně axiální ložisko



6.4 ULOŽENÍ V KULIČKOVÝCH LOŽISCÍCH

Uložení pomocí valivých kuličkových ložisek bylo zkonstruováno firmou Garret. Existují dva typy uspořádání kuličkových ložisek. První je použití dvou oddělených kuličkových ložisek a druhý jsou sdružená ložiska do společného pouzdra, která jsou vzájemně ovlivňována. Vyznačují se malými ztrátami, malou schopností tlumení a vyšší odolností vůči zatížení.[3]

Valivá ložiska byla dříve používána hlavně u nákladních aut, lodních nebo stacionárních motorů, kde turbodmychadla nedosahovala vysokých otáček. Dnes jsou kuličková ložiska vidět u závodních benzínových motorů, kde životnost je počítána na hodiny a vysoká pořizovací cena nehraje roli. Používají speciální ložiska s keramickými kuličkami nebo válečky. Ukázalo se, že jsou tato ložiska vhodnější do extrémních jízdních podmínek, které mohou v motorsportu nastat.[12]



Obr. 10 Schéma uložení v kuličkových ložiscích[15]

(1)-vnitřní natáčecí segment, (2)-tlumič



7 DALŠÍ VÝVOJ TURBODMYCHADEL

Výfuková turbodmychadla dosahují stále vyšších otáček a vyšších plnicích tlaků. U moderních turbodmychadel určených pro vozidlové motory osobních automobilů je to až 300 000 otáček za minutu. U vozidla VW Passat biturbo TDI se plnicí tlak turbodmychadel pohybuje na hranici 2,5 baru. K dosažení vysokého plnicího tlaku a zároveň zachování kompaktních rozměrů tělesa turbodmychadla, výrobci navyšují počet otáček rotoru turbodmychadla. To klade vysoké nároky na použití únosnějších a dražších materiálů, k udržení dlouhodobé spolehlivosti. Snižuje se hmotnost rotorů k dosažení menších setrvačných sil, vedoucí k rychlejšímu rozběhu turbodmychadla. Vytváří se nová ložiska, která dosahují menšího tření, než ložiska konvenčně používaná.

Další možnost zkrácení prodlevy, je elektricky asistované turbodmychadlo. Přesněji kompresor poháněný elektromotorem. Jedná se o malý přídavný kompresor, který slouží ke zkrácení nebo eliminaci prodlevy turbodmychadla. Tento systém vyvíjí automobilka Audi, která ho představila na konceptu vozu RS5 TDI, kde elektrický kompresor o výkonu 7kW plní motor vzduchem v oblasti do 1500 otáček za minutu. V této oblasti nemá motor dostatek spalín na roztočení výfukových turbodmychadel, tak využívá plnicího tlaku elektrického kompresoru. Kompresor není zapojen stále. Nachází se na vedlejší větvi, kterou otevírá obtokový ventil. Kompresor je umístěn až za mezichladičem stlačeného vzduchu, v relativně chladném prostoru, proto nemusí snášet vysoké tepelné zatížení. Výhodou tohoto uspořádání je pružný zátaž motoru z velmi nízkých otáček bez turbo prodlevy. Jedinou zásadnější nevýhodou je podle vyjádření Audi nutnost předělat elektrickou palubní síť automobilu na napětí 48V, z důvodu potřeby litium-iontových baterií, které využívá k pohonu elektrický motor.[21]

Další vývojovým stupněm je integrovaný elektromotor v tělese turbodmychadla mezi oběžná kola turbíny a kompresoru. Toto uspořádání má kompaktnější rozměry. Elektromotor lze také využít jako generátor a zpětně rekuperovat elektrickou energii ze spalín a uložit ji do baterií nebo využít pro pohon elektrických spotřebičů vozu. Turbodmychadla s možností rekuperace elektrické energie a následně pohonu dmychadla elektromotorem jsou součástí monopostů Formule 1 a objevují se ve speciálech značky Audi pro vytrvalostní závody série Le Man. Toto řešení se zatím v osobních vozidlech neobjevuje, protože je konstrukčně složitější, nákladnější a méně spolehlivé. Proto nasazení v motorsportu může pomoci k vývoji této technologie a uspokojit tak použití v osobních vozidlech.[21]



ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo přiblížení problematiky moderních turbodmychadel vozidlových spalovacích motorů, stručně vysvětlit základní pojmy z konstrukce turbodmychadel, porovnat vlastnosti kluzných a valivých ložisek a popsat možnosti uložení rotorů turbodmychadel a jejich použití v dnešní době.

V úvodní části je práce zaměřena na přiblížení problematiky přeplňování pomocí výfukových turbodmychadel, vysvětluje jejich dopad na možné snížení spotřeby paliva a emisí motorů. Také je zaměřena na historický vývoj turbodmychadel na přelomu 19. a 20. století. Dále práce v této části stručně vysvětluje princip přeplňování se zařazeným mezichladičem stlačeného vzduchu a připojeným schématem vysvětlující princip fungování.

Na úvodní část práce navazuje kapitola o konstrukci turbodmychadel. Tato kapitola rozděluje turbodmychadla na konstrukční části, které jsou v textu dále popisovány. Konstrukce turbodmychadel je doplněna podkapitolou vysvětlující nutnost použití regulace plnicího tlaku.

Čtvrtá kapitola pojednává o ložiscích používaných v uložení rotorů turbodmychadel. Popisuje stavbu ložiskové skříně a konstrukci valivých a kluzných ložisek. Dále popisuje pozitiva a negativa použití jednotlivých typů ložisek a porovnává vlastnosti ložisek vhodných pro uložení rotorů.

V páté části se sdružují požadavky kladené na uložení rotorů moderních turbodmychadel. Snahou této kapitoly je vysvětlení komplikované problematiky, jakou je použití ložisek pro uložení turbodmychadel a vysvětluje jednotlivé požadavky na uložení. Podkapitola Vibrace rotorů turbodmychadel se zabývá reakcemi rotorů na vnější buzení. Rozděluje typy vibrací na vibrace samobuzené a dynamické nestability. Podkapitola kmitání rotorů rozděluje jednotlivé módy kmitání vzhledem ke kritickým otáčkám.

V části možnosti uložení turbodmychadel práce popisuje málo známé současné trendy v uložení rotorů, vysvětluje možná pozitiva a negativa každého typu uložení a naznačuje nejvhodnější použití týkající se počtu otáček a velikosti rotorů pro různé druhy motorů. Kapitola je doplněna o kvalitní obrazovou dokumentaci, která naznačuje vnitřní uspořádání sestavy uložení.

V poslední kapitole je nastíněn budoucí vývoj turbodmychadel a přeplňovaných motorů obecně. Zpřísnující emisní limity CO₂, nutí výrobce automobilů ke snižování zdvihového objemu motoru a tlačí tak výrobce k použití přeplňovaných motorů. Z tohoto důvodu jde vývoj turbodmychadel a ložisek používaných v uložení stále dopředu.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ALSAEED, A. A. *Dynamic stability evaluation of an automotive turbocharger rotor-bearing system*, 2005, Diploma thesis, Virginia Polytechnic Institute.
- [2] DRAHÝ, J. *Modální analýza turbínového kola pro letecký motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, 70 s. Diplomová práce.
- [3] FRYŠČOK, T. *Dynamika rotorů moderních turbodmychadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 93 s. Doktorská práce.
- [4] HOFMANN, K. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory: Přepřínování spalovacích motorů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 134 s.
- [5] CHEN, W. J., GUNTER, E. J. *Dynamics of rotor-bearing systems*, Trafford publishing, Canada, 2010, 469s, ISBN 978-1-4120-5190-3.
- [6] KADLEČEK, J. *Přepřínování spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011, 50 s. Bakalářská práce.
- [7] SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE a R. G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2010, 1159 s. [cit.2015-3-18]. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [8] SCHÄFER-NGUYEN, H. *Rotordynamics of automotive turbochargers*. Berlin: Springer, 2012. ISBN 978-3-642-27518-0.
- [9] SVOBODA, P., J. BRANDEJS, J. DVOŘÁČEK a F. PROKEŠ. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011, 234 s. [cit.2015-3-18]. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [10] ŠIMEK, J. *Uložení a dynamika rotorů turbodmychadel* [online]. Dostupné z: www.techlab.cz
- [11] TESAŘ, M. a I. ŠEFČÍK. *Konstrukce vozidlových spalovacích motorů*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003, 172 s. ISBN 80-7194-550-1.
- [12] RŮŽIČKA, S. *Vysokootáčková kluzná ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 81 s. Bakalářská práce.
- [13] ZAPOMNĚL, J. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: Dynamika rotorů*. 1. vyd. Ostrava, 2012.
- [14] FlexaMI Auto. *Princip turbodmychadla* [online]. Flexami auto s.r.o. Dostupné z: <http://www.flexamiauto.cz/teorie/>



- [15] *Honeywell Turbo Technologies* [online]. Honeywell Internacional Inc., 2014. Dostupné z: <http://www.honeywell.cz>
- [16] MAREK, P. *Ložiskové jednotky pro automobilový průmysl* [online]. 2010. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/loziskove-jednotky-pro-automobilovy-prumysl.html>
- [17] TRHOŇ, T. *Turbodmychadlo-historie a současnost* [online]. Dostupné z: <http://clanky.katalog-automobilu.cz/47-turbodmychadlo-historie-a-soucasnost/>
- [18] *TurboCar* [online]. Turbo Car s.r.o. Dostupné z: <http://www.turbocar.cz>
- [19] *Turboservis* [online]. Turboservis Praha s.r.o. Dostupné z: <http://www.turboservis.cz/zavady.htm>
- [20] *Zvyšování výkonu, Turbodmychadla* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: http://www.iae.fme.vutbr.cz/opory/prislusenstvi/zvysovani_vykonu.html. Studijní opory Dopravního a automobilního inženýrství
- [21] REJLEK, J. *Elektrické turbo-hit budoucnosti* [online]. iFaster.cz, 2014. Dostupné z: <http://ifaster.cz/elektricke-turbo-hit-budoucnosti/>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | | |
|-----------|----------------------|-----------------------|
| F_u | [N] | síla od nevyváženosti |
| m | [kg] | hmotnost |
| U | [g/mm] | nevyváženost rotoru |
| λ | [-] | stechiometrický poměr |
| Ω | [min ⁻¹] | otáčky rotoru |



SEZNAM OBRÁZKŮ

- [1] Obr. 1 Schéma přepřňovaného motoru se zařazeným mezichladičem
- [2] Obr. 2 Řez turbodmychadlem
- [3] Obr. 3 Ložisková skříň s kompresorovým a turbínovým oběžným kolem
- [4] Obr. 4 Ložisková jednotka s valivými ložisky pro turbodmychadla
- [5] Obr. 5 Radiální kluzné ložisko
- [6] Obr. 6 Módy kmitání hřídele
- [7] Obr. 7 Schéma plně plovoucího uložení
- [8] Obr. 8 Schéma částečně plovoucího uložení
- [9] Obr. 9 Schéma radiálně axiálního uložení
- [10] Obr. 10 Schéma uložení v kuličkových ložiscích